



EFECTO DE LA VENTILACIÓN NATURAL EN EL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN EDIFICIO BIOCLIMÁTICO. ANÁLISIS Y ESTUDIO MEDIANTE ENERGY PLUS

EFFECT OF NATURAL VENTILATION ON THE ENERGY CONSUMPTION OF A BIOCLIMATIC BUILDING. ANALYSIS AND STUDY THROUGH ENERGY PLUS

MARÍA VICTORIA MERCADO
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas
(CONICET). Mendoza, Argentina
mvmercado@mendoza-conicet.gob.ar

GUSTAVO BAREA PACI
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas
(CONICET). Mendoza, Argentina
gbarea@mendoza-conicet.gob.ar

ALFREDO ESTEVES
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas
(CONICET). Mendoza, Argentina
aesteves@mendoza-conicet.gob.ar

CELINA FILIPPÍN
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET). Santa Rosa, Argentina
cfilippin@cpenet.com.ar

RESUMEN

El enfriamiento pasivo a través de la ventilación natural presenta un gran potencial para viviendas unifamiliares en climas templados continentales como lo es el de la ciudad de Mendoza, ubicada al centro oeste de la República Argentina. Esta estrategia persigue evitar riesgos de sobrecalentamiento y reducir la necesidad de uso de los equipos mecánicos. El objetivo del estudio expuesto es evaluar la influencia de la ventilación natural diurna y nocturna en el consumo de energía en condiciones reales de uso de una vivienda con construcción tradicional y construcción industrializada. Para ello, se usó un modelo computacional de una vivienda unifamiliar, modelada y ajustada en el programa Energy Plus v8.6. Y, para el modelado de la ventilación natural, se utilizó "Airflow Network" (algoritmo AIRNET), validado por Gu (2007) y Crawley et al. (2001). Los resultados indican que, tanto en la construcción másica como en la liviana, con ventilación nocturna, los consumos energéticos son menores en 50% que ventilando de día. La ventilación natural en edificios bioclimáticos resulta una estrategia indispensable para el enfriamiento del mismo. En esta situación radica la importancia de contar con una herramienta de simulación para el ensayo de diferentes modos de uso y control de la misma.

Palabras clave

ventilación natural, simulación computacional, desempeño energético.

ABSTRACT

Passive cooling through natural ventilation has a great potential for single-family homes and temperate continents such as the city of Mendoza, located in the central west of the Argentine Republic. This strategy seeks to end the risks of overheating and reduces the energy consumption of mechanical conditioning equipment. This study aims to evaluate the influence on energy consumption, in two ventilation scenarios (day and night) for two constructive resolutions (light and mass). For this, a computational model of a single-family house, modeled and adjusted in the Energy Plus v8.6 program was used. For the ventilation model, "Airflow Network" (AIRNET algorithm) validated by Gu (2007) y Crawley et al. (2001) was used. The results indicate that, in the construction as well as in life, with night ventilation the energy consumptions are lower in 50% than they ventilate during the day. The natural ventilation in bioclimatic buildings is an indispensable strategy for the cooling of the same. In this situation lies the importance of having a simulation tool to test different scenarios of use and control of the same.

Keywords

natural ventilation, computer simulation, energy performance.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los usuarios tiene un impacto potencial sobre el rendimiento de los edificios, dadas sus interacciones con los sistemas de iluminación, ventilación, climatización, manejo de ventanas y dispositivos de sombreados (Brager y Baker, 2009; Corgnati et al., 2011; Hoes et al., 2009; Yun y Stemeers, 2008). Filippín et al (2005) afirmaron, en ese sentido, que es importante el entendimiento de las interacciones de los ocupantes en su ambiente interior ya que afectarán directamente el uso de energía en la misma medida que los parámetros mecánicos.

En efecto, las interacciones del usuario con el funcionamiento de las ventanas son importantes para lograr condiciones de confort térmico aceptables para aquellos edificios en los que se han considerado en su diseño estrategias pasivas, tales como ventilación natural (Fabi et al., 2012; Liping y Hein, 2007). Nicol (2001) advierte que si una persona se encuentra en discomfort tomará medidas para restablecer su comodidad, lo que denomina como el *enfoque adaptativo*. En otro trabajo, Nicol y Humphreys (2002) señalan que ante la incomodidad de los usuarios de un edificio, estos pueden abrir las ventanas en función de dos razones: mejorar la calidad del aire o mejorar el confort reduciendo la temperatura y propiciando el movimiento del aire; siendo numerosos los autores que han desarrollado sus trabajos en ambas líneas (Hoes et al., 2009; Corgnati et al., 2011; Iwashita y Aksaska, 1997). La presente investigación ahonda en la última de ellas.

Diversos investigadores han indagado y avanzado en esa dirección. Raya et al. (2001), por ejemplo, estudiaron al usuario en relación a la manipulación de las aberturas en 15 edificios de oficinas, durante un período de verano. El estudio se centró en el análisis de la relación de las aberturas con las temperaturas interiores, exteriores y el confort térmico. Se encontró que la proporción de ventanas abiertas aumenta con un aumento de la temperatura interior y exterior. Sólo unas pocas ventanas están abiertas cuando la temperatura exterior es inferior a 15°C, mientras que la mayoría de las ventanas están abiertas cuando la temperatura excede los 25°C. La incidencia de malestar del usuario está fuertemente relacionada con el uso de las ventanas, lo que sugiere que este control se utiliza en respuesta a la incomodidad. Los ocupantes que se sientan cerca de una ventana y que tienen un mayor acceso a controlarla reportan menos molestias que los más alejados a ellas.

Ebel et al., (2003) llevan a cabo un seguimiento del comportamiento de los usuarios de edificios residenciales pasivos (con un consumo de energía <15 kWh /m²) durante todo un año. Se midió, en esta investigación, el número de horas que una ventana estaba abierta durante el día de verano. A partir de febrero, las ventanas se mantuvieron abiertas durante más tiempo que durante invierno, lo que sugiere que los ocupantes comienzan a cambiar su comportamiento al final de la temporada de calefacción.

Seguido por la radiación solar, la temperatura exterior tiene el efecto más fuerte sobre el uso de ventanas. A partir de 8°C, la cantidad de horas de apertura de las ventanas aumenta aritméticamente hasta que se alcanza un máximo de 18°C.

Lambert et al (2016) evaluaron diferentes escenarios de comportamiento de los ocupantes en relación a la ventilación natural, la masa térmica y el consumo de energía en un clima subtropical. Llegaron a la conclusión que los casos con baja transmitancia térmica y capacidad térmica media mostraron una reducción en el consumo de energía para la refrigeración del 32%, ventilando en la mañana (343,6 kWh/mes); de un 66%, ventilando automáticamente con sensores predeterminados (33,19 kWh/mes), y de un 43%, ventilando de noche los espacios (62,88 kWh/mes). Por lo tanto, en este clima en particular, los edificios con capacidad térmica media tienen un mayor potencial para proporcionar confort térmico a los usuarios, con un control adecuado de la ventilación del edificio. Para climas mediterráneos, se ha demostrado la importancia de alta masa térmica de la envolvente del edificio en la eficacia de la ventilación nocturna. Es factible disminuir la temperatura máxima del aire de 3 a 6°C (Haldi y Robinson, 2009; Michael, Demosthenous y Philokyprou, 2017; Shaviv, Yezioro y Capeluto, 2001).

Los resultados de los estudios antes mencionados no pueden ser aplicados a cualquier edificio, se debe tener en cuenta variables que juegan un papel importante como: el clima, la cultura, la estructura del edificio, la tipología del espacio (residencial, comercial o edificio de oficinas), entre otras. En relación al clima la ventilación diurna, es más apropiada para climas templados, donde la temperatura del aire y la humedad del ambiente externo caen dentro de los límites de confort. Por el contrario, la ventilación nocturna es preferible para el enfriamiento en regiones donde la temperatura del aire exterior nocturno es de alrededor de 20°C y la fluctuación de la temperatura diurna es de más de 10°C (Givoni, 1998). La potencialidad de utilizar la ventilación natural en la ciudad de Mendoza es alta, considerando que la situación climática se puede caracterizar como mediterránea (cálido árido). Chen, Tonga y Malkawia (2017) han calculado "la hora NV" para 1854 ciudades del mundo. Las horas NV son el número de horas en un año típico (de 8760 h) cuando las condiciones climáticas exteriores (por ejemplo, velocidad del viento, temperatura, humedad) son adecuadas para utilizar la ventilación natural. Entre las ciudades evaluadas, se encuentran Buenos Aires y Santiago de Chile (4514 y 4297, respectivamente), presentando potencialidades similares en cuanto a la cantidad de horas NV. Sin embargo, al sumarse las horas NO NV (no aptas para ventilación natural por alto nivel de humedad relativa), las horas de Buenos Aires son más altas que las de Santiago, en una relación de 3 a 1. Por cierto, la ciudad de Mendoza se asemeja más a las condiciones climáticas de Santiago que a las de Buenos Aires.

Las herramientas computacionales de simulación térmica y energética son instrumentos importantes para la comprobación y análisis de los edificios en términos de su comportamiento tanto energético como térmico, acústico y de iluminación, por nombrar algunos. Para una definición de un modelo computacional confiable, que represente bien el comportamiento térmico y energético de determinado edificio de estudio, es esencial que este modelo esté correctamente calibrado (Chen, Tonga y Malkawia, 2017). En ese contexto, uno de los programas más confiables es EnergyPlus, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, el cual se utilizó en este trabajo (DOE, 2016).

El objetivo de este estudio es evaluar la influencia del comportamiento de los usuarios al ventilar sus viviendas en relación al consumo energético. Se realiza en dos situaciones de aperturas de ventanas (diurna y nocturna) y para dos composiciones de envolvente (tradicional e industrializada). La envolvente tradicional supone mayor cantidad de masa y capacidad térmica que un sistema de tipo industrializado. En la actualidad, el desarrollo de nuevos materiales y técnicas constructivas han propiciado el auge de la construcción modular "industrializada" con tecnología de avanzada. Según el arquitecto Roper (Roper y Comas, 2013), este tipo de construcción involucra una respuesta a la demanda cada día más exigente acerca de precios, plazos de ejecución, entrega y bajo impacto ambiental en el proceso de construcción y sostenibilidad.

METODOLOGÍA

CASO DE ESTUDIO

El Gran Mendoza es el conglomerado urbano más importante de la provincia de nombre homónimo, alberga el 64% de la población y ocupa el 11% del territorio mendocino. Se ubica en latitud 32° 52'S y longitud 68° 51'O, en centro oeste de la República Argentina (Figura 1).

El caso de estudio se encuentra emplazado en un barrio de baja densidad en la periferia Mendoza. Se trata de una vivienda aislada en lote individual, es decir, no comparte medianera con construcciones vecinas. El edificio es compacto y distribuido en dos plantas. En planta baja se hallan los espacios de uso diurno y en planta alta, las habitaciones y el baño. Se trabajó sobre esta tipología por ser representativa de gran parte del parque habitacional construido en los últimos años en la ciudad de Mendoza. La vivienda tiene una superficie cubierta de 120m² (Figura 2).

MODELO DE SIMULACIÓN.

Para el presente estudio se simuló la vivienda en estado dinámico con el *software* Energy Plus (version 8.5-DOE, 2016). Se trata de un *software* libre desarrollado por LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). Este programa

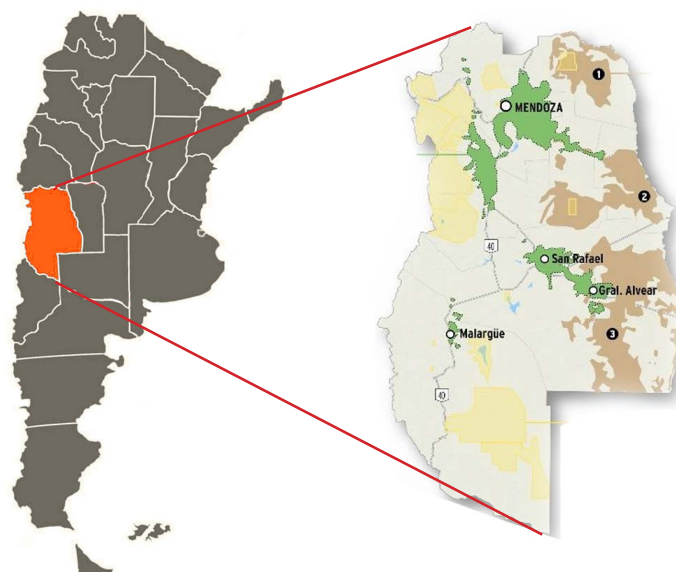


Figura 1. Situación geográfica de la ciudad de Mendoza.
 Fuente: Elaboración de los autores.

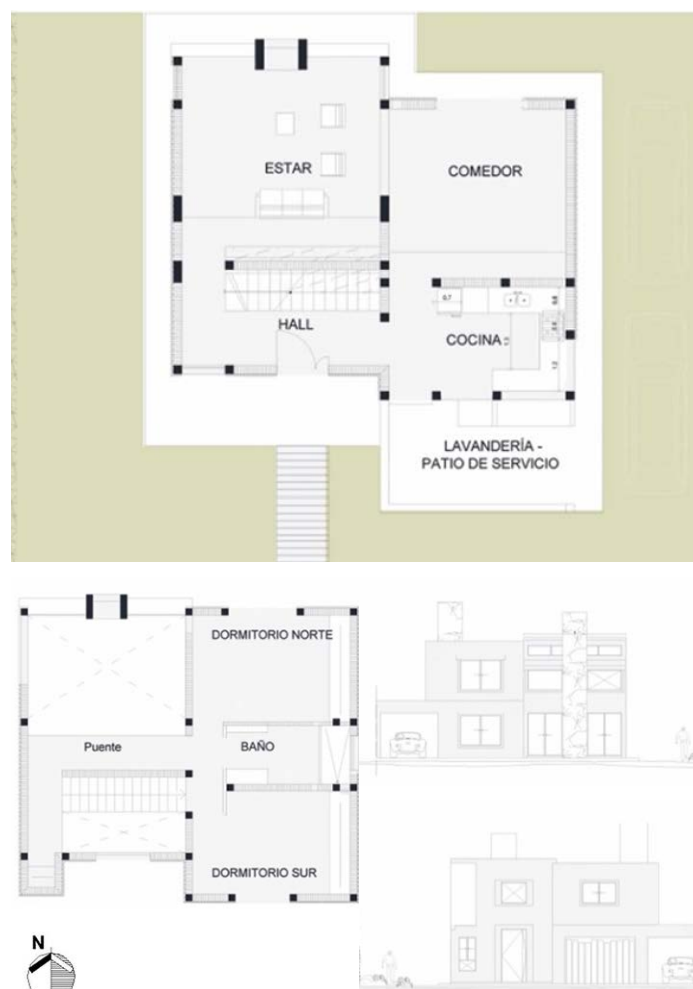


Figura 2. Plantas y vistas de la fachada norte y sur del caso de estudio.
 Fuente: Elaboración de los autores.

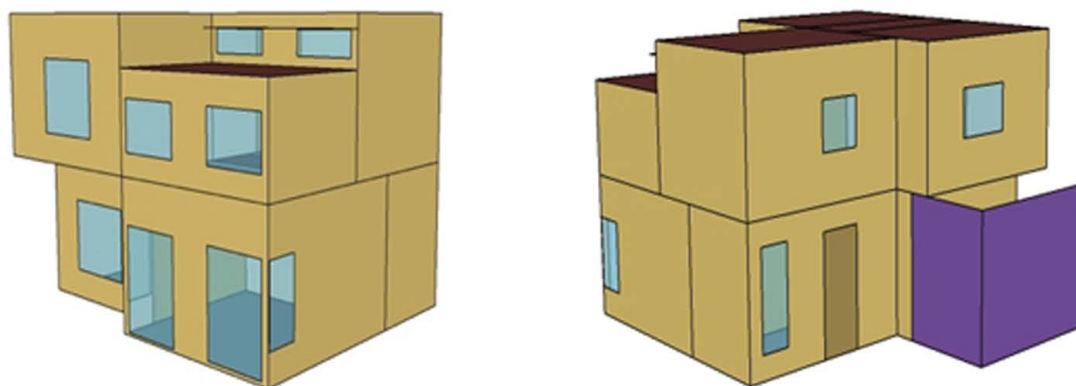


Figura 3. Modelo 3D en Legacy Open Studio. Fuente: Elaboración de los autores

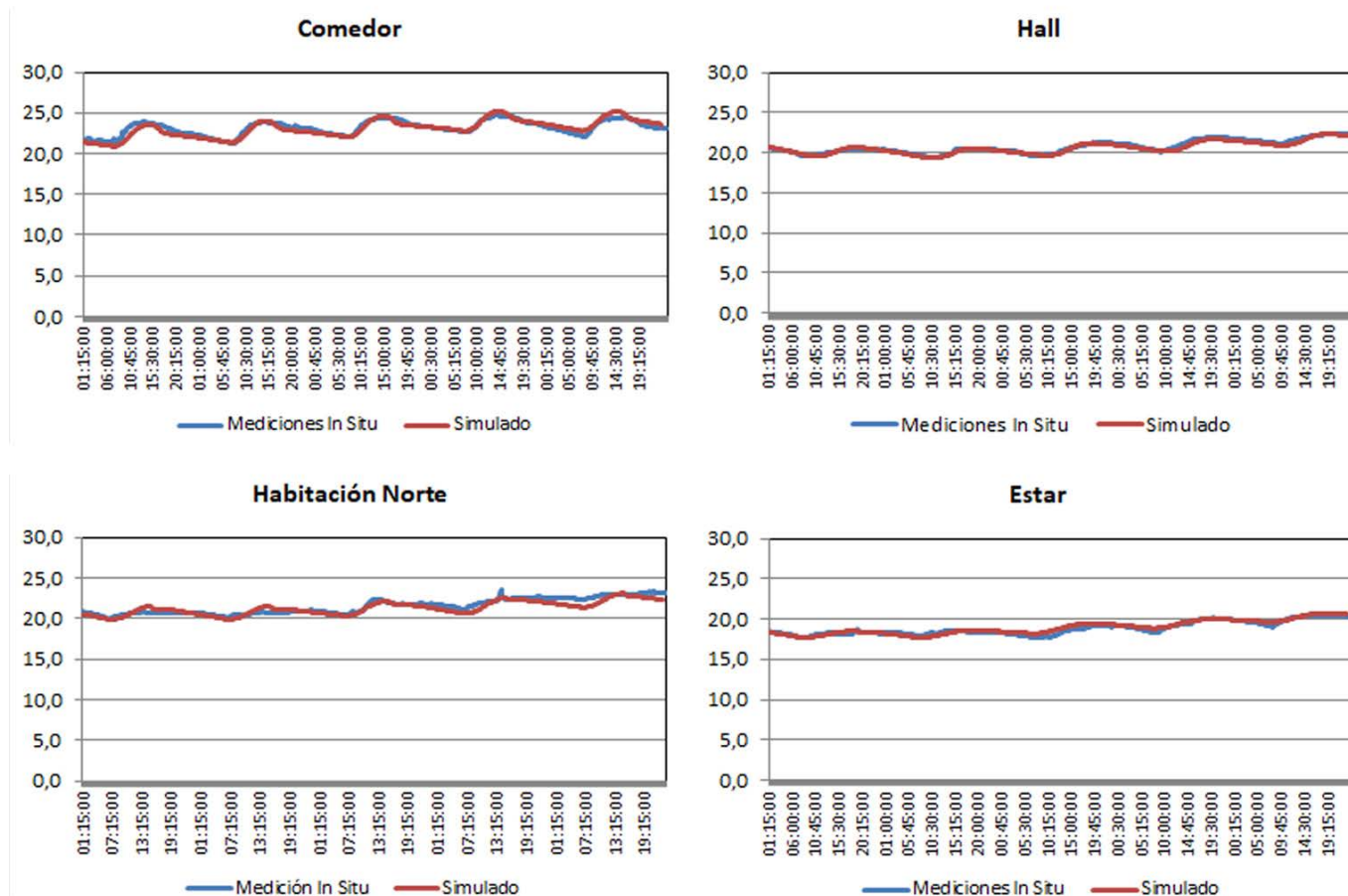


Figura 4. Curvas de ajuste del modelo en Energy Plus con datos monitoreados *in situ*. Fuente: Mercado, Barea y Esteves, 2015: 05.155.

	Paredes			Techos		
	U	α	ϵ	U	α	ϵ
1. Másico	0.6	0.3	0.7	0.38	0.1	0.9
2. Liviano	0.7	0.3	0.7	0.28	0.1	0.9

Tabla 1. Propiedades de la envolvente utilizadas en las simulaciones, transmitancia térmica (U), absorptividad solar (α) y emisividad (ϵ).
 Fuente: Elaboración de los autores.

ofrece la posibilidad de obtener variables de salida, como ambientales, térmicas, energéticas y físicas.

Las determinaciones generales contempladas para la simulación térmica y energética de la vivienda fueron:

- Se dividió la vivienda en 9 zonas térmicas: 4 en planta baja (*hall* abajo, cocina, comedor y estar) y 5 en primer piso (*hall* arriba, estar arriba, habitación norte, habitación sur y baño).

- En relación a los coeficientes convectivos, para muros interiores se fijaron en 6W/mK , mientras que para el resto de los elementos, se tomaron los calculados por el programa por medio de algoritmos matemáticos.

- Las renovaciones de aire se consideraron constantes de un cambio de aire por hora y se estableció para todas las zonas térmicas conectadas al exterior a través de ventanas y/o puertas.

- Dado que las temperaturas de aire interior que calcula el programa representan la uniformidad térmica de toda la habitación, en el caso del local de *hall* de doble altura se dividió en dos zonas térmicas: una inferior, correspondiente a planta baja, y una superior, correspondiente a planta alta. Para esto se utilizó la herramienta *Material: Infrared Transparent*, que posibilita la transmisión de la radiación solar al espacio contiguo por debajo. Además, se empleó la herramienta *Zone Cross Mixing* que permite simular el movimiento de aire entre dos zonas de estas características.

Cabe señalar que la vivienda ha sido utilizada como caso de estudio en un trabajo anterior para el análisis energético (Mercado, Barea y Esteves, 2015). En dicho trabajo se efectuó el ajuste del modelo de simulación a la situación real. En la Figura 4, se presentan las curvas para las principales zonas térmicas, comprendiendo los resultados de temperatura de aire otorgados por la simulación en comparación con los resultados de monitoreo *in-situ*.

CARACTERÍSTICAS DE LA ENVOLVENTE.

La casa se encuentra construida con sistema constructivo denominado "tradicional" y está compuesta por mampostería de ladrillo cerámico macizo de 17cm de espesor, y estructura independiente sismo-resistente de hormigón armado. Los muros son revocados en ambas caras, con la colocación de aislación térmica (poliestireno expandido) por el exterior

(2" de espesor). La cubierta se construyó con estructura metálica, compuesta por machimbre de pino, poliestireno expandido como aislación térmica (3" de espesor), carpeta de compresión y aislación hidrófuga. Las ventanas son de aluminio, con doble vidriado hermético (3+9+3). Los muros exteriores quedan totalmente expuestos, separados de los límites del terreno. Se destaca que al muro oeste no se le colocó aislación térmica, debido a una futura ampliación. El FAEP es de 1.5, lo que supone que es un diseño compacto y eficiente desde el punto de vista del diseño de la envolvente (Esteves, Gelardi y Oliva, 1997).

ENVOLVENTES SIMULADAS

Sobre el modelo ajustado con las mediciones reales (Mercado, Barea y Esteves, 2015), se simularon dos combinaciones diferentes: La construcción existente (tradicional) y otra construcción con envolvente industrializada.

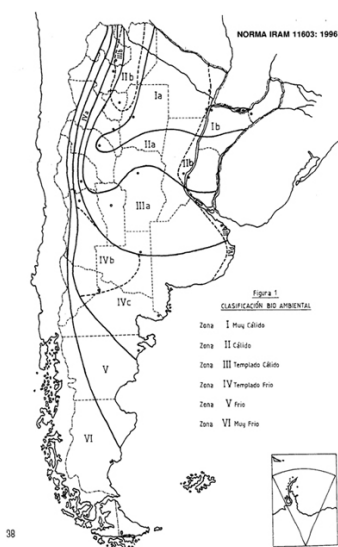
Para la construcción real, con envolvente tradicional descripta anteriormente, se consideró una transmitancia térmica $U=0.6\text{W/m}^2\text{°C}$ para muros (ladrillo cerámico macizo con aislación térmica y revoques), entepiso y techo un $U=0.38\text{W/m}^2\text{°C}$ (losa alivianada, aislación de poliestireno expandido de 4", carpeta de compresión y membrana hidroasfáltica).

Para el caso de la construcción industrializada, se tiene cuenta un $U=0.7\text{W/m}^2\text{°C}$ para muros (estructura metálica, hormigón inyectado sobre malla metálica en interior y exterior y alma de aislación térmica de poliestileno expandido de 0.05m), el entepiso con un $U=0.17\text{W/m}^2\text{°C}$ (estructura de acero, machimbre de pino de 1") y el techo con un $U=0.28\text{W/m}^2\text{°C}$ (correas madera, machimbre de pino de 3/8", aislación térmica de 0.10m, carpeta de compresión y membrana hidroasfáltica).

En muros, se consideró una absorción a la radiación solar de 0.3 (α), lo que representa un color claro, y la emisividad (ϵ) de 0.7. En techos $\alpha=0.1$ (terminación de aluminio) y $\epsilon=0.9$ en techos. La Tabla 1 presenta las propiedades consideradas para muros y techo en la simulación (IRAM 11605, 1996).

DATOS CLIMÁTICOS.

La ciudad de Mendoza se encuentra situada en una región cuyo clima se clasifica como templado frío de máxima irradiancia, siendo la zona IV de la clasificación bioambiental de la República Argentina (IRAM 11603). Este clima presenta una alta amplitud térmica, cercana a los 15°C . En enero (verano), se registran las mayores temperaturas cercanas a máximas



Verano (enero)

Temperatura	Máxima media	°C	30.1
	Media		23.6
	Mínimo media		17.9
	Amplitud térmica		15.0
Máxima absoluta			38.0
Velocidad media del viento		Km / h	10.5
Humedad relativa media	--	%	49
Heliofanía relativa	—		0.65
Radiación solar global diaria sobre superficie horizontal		MJ / m ² días	25.7

Figura 5. Zonificación bioclimática Norma IRAM 11603 y datos climáticos. Fuente: Elaboración de los autores.

absolutas de 40°C, la radiación solar es típica de zonas semidesérticas, registrando un valor de 25MJ/m² (Figura 5). Para el ajuste del modelo, se utilizaron datos meteorológicos medidos *in situ* (Mercado, Barea y Esteves, 2015). Luego, para el análisis comparativo de casos de estudios, se usó un archivo climático TMY, de acuerdo con metodología validada por otros autores (ASHRAE, 2009; González y Díaz, 2013; Hensen, 1999).

En base a la carta bioclimática se advierte que la ventilación natural aparece como una estrategia de corrección para la ciudad de Mendoza. Las brisas para enfriamiento desde el sureste son frecuentes para la localización en estudio (Figura 6). La vivienda en estudio, en la etapa de diseño, ha considerado la orientación de las aberturas en relación a la dirección y frecuencia de los vientos del lugar, es decir, hacia el Norte y Sur, propiciando así la ventilación cruzada como estrategia de enfriamiento pasivo.

Escenarios de estudio: manejo y control de la ventilación natural por parte de los usuarios.

Los escenarios seleccionados responden al comportamiento del usuario. Se advierten dos situaciones diferenciadas en cuanto al horario en que los usuarios abren las ventanas: por el día (ventilación diurna) y por la noche (ventilación nocturna). Estas rutinas son respuestas comunes, en la región estudiada, que responden a la sensación térmica que perciben los usuarios.

Ventilación diurna: Todas las ventanas se abren desde las 8:00h hasta las 23:00h, los días laborables y los fines de semana. El comportamiento de los usuarios se considera independiente de la temperatura ambiente.

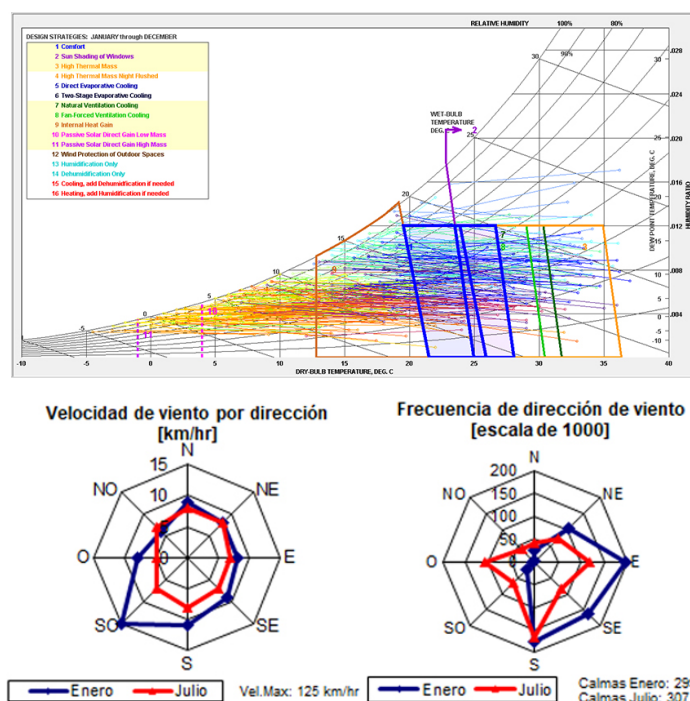


Figura 6. Carta bioclimática (Fuente: programa AnalisisBioLabee) y rosas de los vientos -velocidad y frecuencia- en Mendoza. Fuente: Elaboración de los autores.

Ventilación nocturna: Todas las ventanas se cierran durante la mañana y tarde, y se abren solo por la noche, desde las 21:00h hasta las 9:00h, si la temperatura exterior lo permite.

Requerimiento energético: Para conocer el consumo energético que tendría el edificio para compensar o

	Paredes	Techos
	Ventilación Diurna	Ventilación Nocturna
Envolvente Tradicional (EM)	EM-VD EM-VD-(Qw)	EM-VN EM-VN-(Qw)
Envolvente Industrializada (EL)	EL-VD EL-VD-(Qw)	EL-VN EL-VN-(Qw)

Siendo:

EM: envolvente tradicional, EL: envolvente industrializada,

VD: ventilación diurna, VN: ventilación nocturna, Qw: requerimiento energético

Tabla 2. Casos simulados.

Fuente: Elaboración de los autores.

alcanzar la situación de confort térmico, se establece una temperatura de termostato de 24°C. A partir de esto, es posible establecer la cantidad de energía que se requerirá para poder alcanzar esta temperatura por medio de un sistema de acondicionamiento mecánico. Con este propósito, se emplea el descriptor HVAC: Templates que permite pedir como dato de salida la cantidad de energía por el período de simulación de un sistema cualquiera. Esta herramienta del programa no tiene en cuenta intercambio de calor latente y sensible, solo cuantifica la energía para alcanzar la temperatura de termostato.

Considerando la diferenciación en dos tipos de envolvente y los diferentes usos de la ventilación natural, se consolidan cuatro escenarios de simulación. Para cada escenario, se analiza el requerimiento energético con termostato en 24°C.

MODELADO DE LA VENTILACIÓN NATURAL.

Para el estudio de la influencia de la ventilación natural en el comportamiento térmico y energético, se utilizó el módulo de cálculo "Airflow Network" (algoritmo AIRNET) del software Energy Plus. Para el control del flujo de aire se usó el objeto Airflow Network: Multi Zone: Component: Detailed Opening donde se debe especificar las propiedades de flujo de aire a través de las ventanas y puertas cuando están cerradas o abiertas.

El coeficiente de flujo de masa de aire cuando la abertura está cerrada (Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed) contempla cuatro grietas alrededor del perímetro de la ventana o puerta y está en función de las dimensiones de la abertura. Los datos ingresados en este objeto se presentan en la Tabla 2.

RANGOS E ÍNDICES DE CONFORT.

El confort de las habitaciones se analiza en relación al rango propuesto por Givoni (1998) para climas fríos de países en vías de desarrollo. En invierno, las temperaturas son menores que en verano, obedeciendo a un mayor nivel de vestimenta y la aclimatación del cuerpo humano. En el verano, el rango de confort sube. Es importante notar que este efecto puede hacer ahorrar mucha energía en el acondicionamiento del aire, tomando en cuenta que el rango de temperatura es más elevado en la estación de verano.

Valores adoptados	Puertas	Ventanas
Coeficiente de flujo de aire-masa cuando la abertura se cierra [Kg/s-m]	0.00124 Kg/s-m	0.00058 Kg/s-m
Exponente de flujo de aire-masa cuando la abertura se cierra (adimensional)	0.65	0.65
Factor de abertura -número (adimensional)	2	2
Valor máximo de factor de abertura (adimensional)	1	0.5

Tabla 2. Valores adoptados en el modelo de simulación en el objeto (ASHRAE, 2009). Fuente: Elaboración de los autores.

El rango de confort utilizado para el análisis térmico de los espacios de la vivienda se ubica entre 20° y 27°C, respondiendo a la estación estival, periodo en el cual se realiza el estudio. Por otro lado, y cuando se deba establecer sólo una temperatura para configurar el termostato, se utiliza 24°C.

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

TEMPERATURAS INTERIORES – HISTOGRAMAS.

En este punto, se presentan los resultados de los escenarios simulados en un día típico de verano para los espacios de estar (espacio de doble altura), comedor y la habitación principal (espacios con orientación norte). Después, se analizan las frecuencias de temperaturas en un rango de clases de 16°C a 40°C (amplitud en la cual se engloba a todas las temperaturas simuladas).

En la Figura 7 se observan las temperaturas internas de los ambientes mencionados para la construcción tradicional. La situación térmica de los locales, cuando la ventilación no se produce, permanece considerablemente estable, reduciendo drásticamente la amplitud térmica que se presenta en el exterior. Sin embargo, la condición negativa de este escenario es la lejanía de esta situación térmica en relación al rango de confort. Por el contrario, el caso con ventilación nocturna es el que presenta más cantidad de horas dentro de este rango sin la necesidad de energía auxiliar. De igual modo, se advierte un aumento de la amplitud térmica interior. En esta condición de ventilación las temperaturas descienden a 24°C, 22°C y 25°C (estar, comedor y habitación) y durante las horas de sol alcanzan una temperatura de 31°C, 27°C y 28°C, respectivamente. Al ventilar de día, disminuye la amplitud térmica pero se

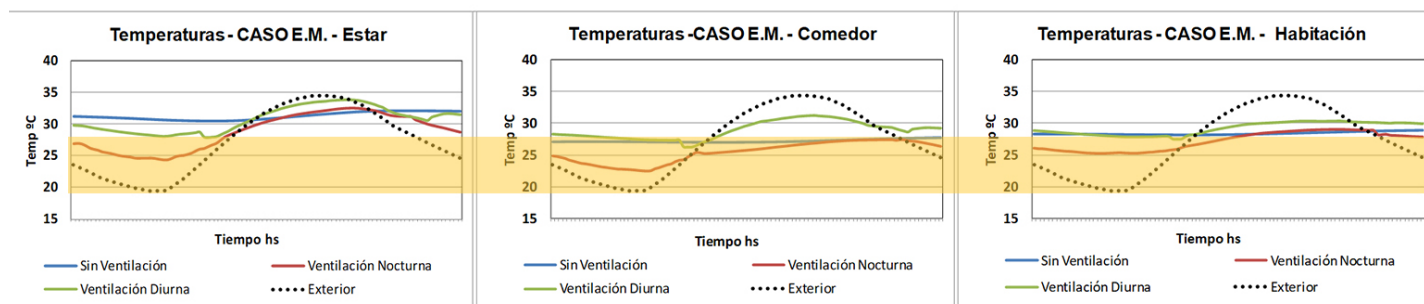


Figura 7. Temperaturas de los escenarios de ventilación, para el caso de envolvente másica. Fuente: Elaboración de los autores.

alcanza mayores temperaturas en horarios diurnos (33°C, 32°C y 31°C) cuando la temperatura exterior es de 34°C.

La Figura 8 presenta los histogramas para el caso con envolvente tradicional. Se aprecia allí que los mayores porcentajes de frecuencias de temperaturas altas se producen cuando no se ventila. Este porcentaje disminuye considerablemente cuando el usuario decide ventilar por la noche.

En el espacio del estar (con orientación norte y pared opaca al oeste), en el primer escenario, el 73% de las temperaturas oscilan entre 32°C y 34°C (36% de 32°C y 37% de 34°C). Al ventilar durante las horas de sol, ese porcentaje disminuye, 24% para 32°C, 27% para 30°C y solamente un 13% para 34°C. La ventilación nocturna hace descender más los porcentajes de las temperaturas más altas, 16% para 32°C y 12% para 34°C, con lo que aumentan las frecuencias de temperaturas cercanas a la zona de confort. Para el comedor (con orientación norte y pared opaca al este), para el primer escenario, el 45% para temperaturas del orden de los 30°C, no registra temperaturas tan altas como el estar. No obstante, cuando se ventila de día, no disminuye demasiado el porcentaje de temperaturas superiores a la zona de confort, ya que las temperaturas exteriores están altas (35°C). Con ventilación nocturna, las frecuencias se corren hacia las temperaturas más bajas, logrando un 60,8% de temperaturas que varían desde 18°C a 26°C.

Al analizar la habitación (con orientación norte y pared opaca al este, con techo expuesto al exterior), se observan frecuencias más altas que los otros espacios. Esto se debe a que tiene mayor superficie expuesta hacia el exterior. Ahora bien, la tendencia es la misma, los porcentajes de frecuencias de temperaturas altas disminuyen ventilando el espacio por la noche.

En la Figura 9 se advierten las temperaturas internas para la construcción liviana. Cuando no se produce ventilación, al igual que el caso con envolvente másica, las temperaturas permanecen estables, pero cuando se produce ventilación diurna o nocturna, aumenta la amplitud térmica interior.

Con ventilación diurna, temperaturas del estar, el comedor y la habitación descenden a 24°C, 25°C y 26°C, respectivamente y durante las horas de sol, alcanzan, de igual modo, una temperatura de 37°C, 35°C y 33°C. Al ventilar de noche, las temperaturas nocturnas de dichos espacios alcanzan 22°C, 22°C y 25°C y en el día, 39°C, 30°C y 33°C, respectivamente.

Las frecuencias de temperaturas para cada escenario en el caso de la envolvente liviana, se exponen en la Figura 10. La tendencia hacia la disminución de las temperaturas superiores a la banda de confort cuando se realiza ventilación nocturna en los espacios, se mantiene, al igual que en el caso con envolvente tradicional.

En el espacio del estar, el 81.4% de las temperaturas oscilan entre 32°C y 36°C (26.8% en 32°C, 38.5% en 34°C y 16.1% en 36°C) cuando no se ventila el espacio. Al ventilar durante las horas de sol, ese porcentaje disminuye a 51.3% para las mismas temperaturas. La ventilación nocturna hace descender los porcentajes de aparición de temperaturas altas, al 36.6%. Para el comedor, sin ventilar, se advierte un 47.3% para temperaturas del orden de los 30°C y 32°C. Cuando se ventila de día, no disminuye el porcentaje de temperaturas superiores a la zona de confort, pero aparecen temperaturas inferiores a 24°C. Con ventilación nocturna, las frecuencias de temperaturas altas (mayores de 30°C) descenden el porcentaje a 23.7%, logrando un mayor porcentaje de temperaturas dentro de la zona de confort. En la habitación, las frecuencias sin ventilación llegan a un 67.5% de temperaturas entre 30°C y 32°C. Al ventilar diurnamente, no descende considerablemente la frecuencia de temperaturas altas, 54.7%. No obstante, estos porcentajes disminuyen ventilando nocturnamente el espacio, 45%.

En este caso, donde la envolvente tiene poca masa térmica (industrializada) y es conservativa, se puede presentar un acercamiento entre las temperaturas máximas y mínimas interiores, cuando no se utilice la ventilación como estrategia de refrescamiento interior.

En este modelo se observa que la actuación de los escenarios de ventilación propicia, a los diferentes espacios,

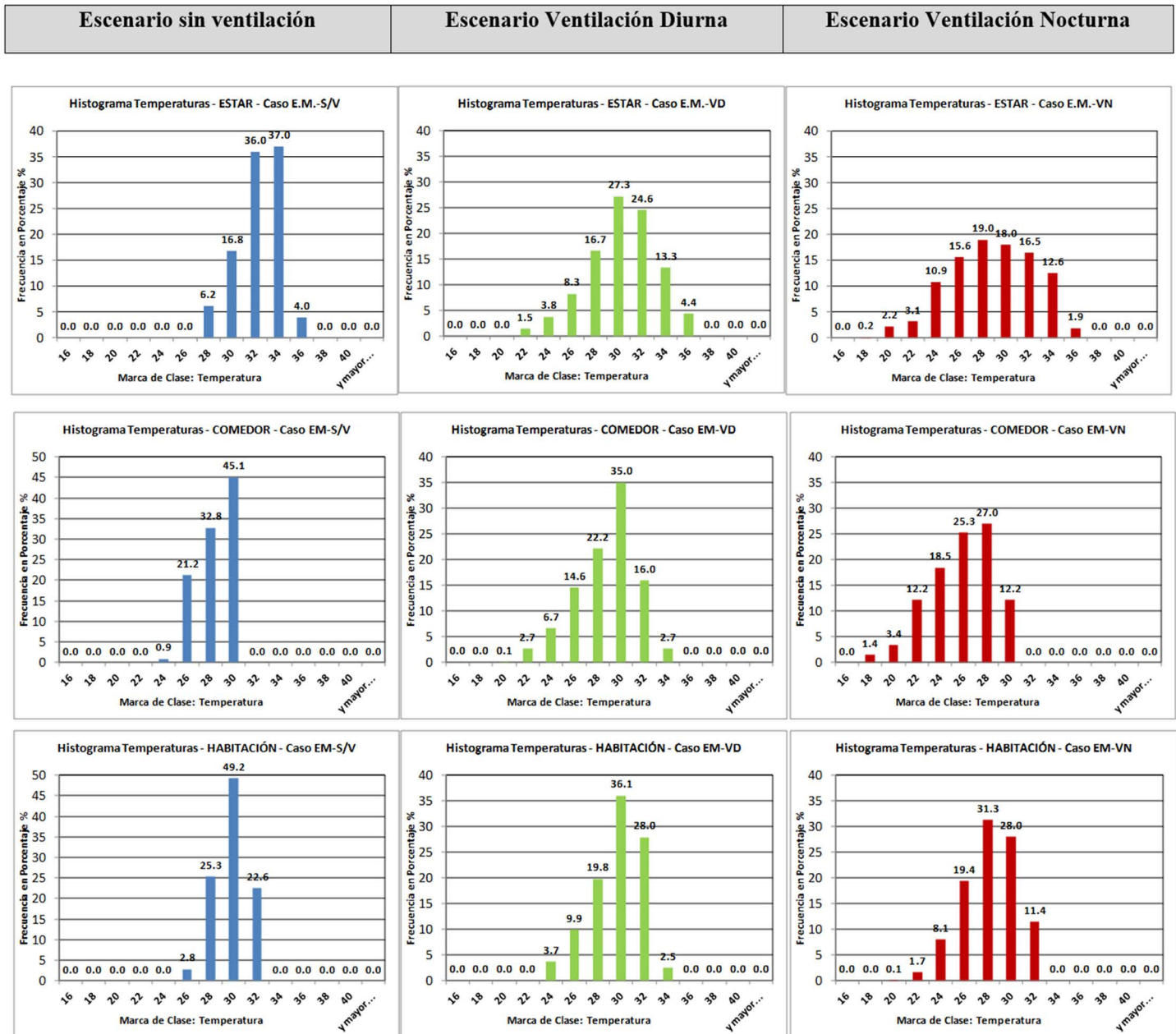


Figura 8. Histogramas de cada uno de los escenarios para cada espacio. Fuente: Elaboración de los autores.

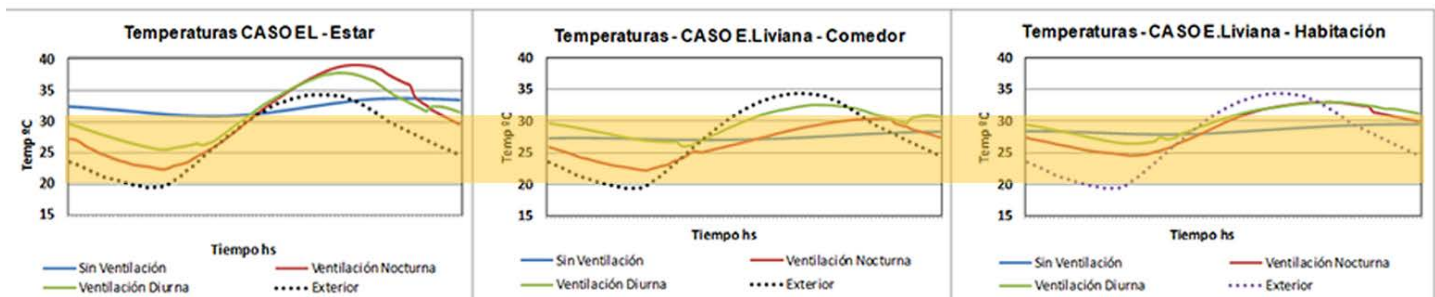


Figura 9. Temperaturas de los escenarios de ventilación, para el caso de envolvente liviana. Fuente: Elaboración de los autores.

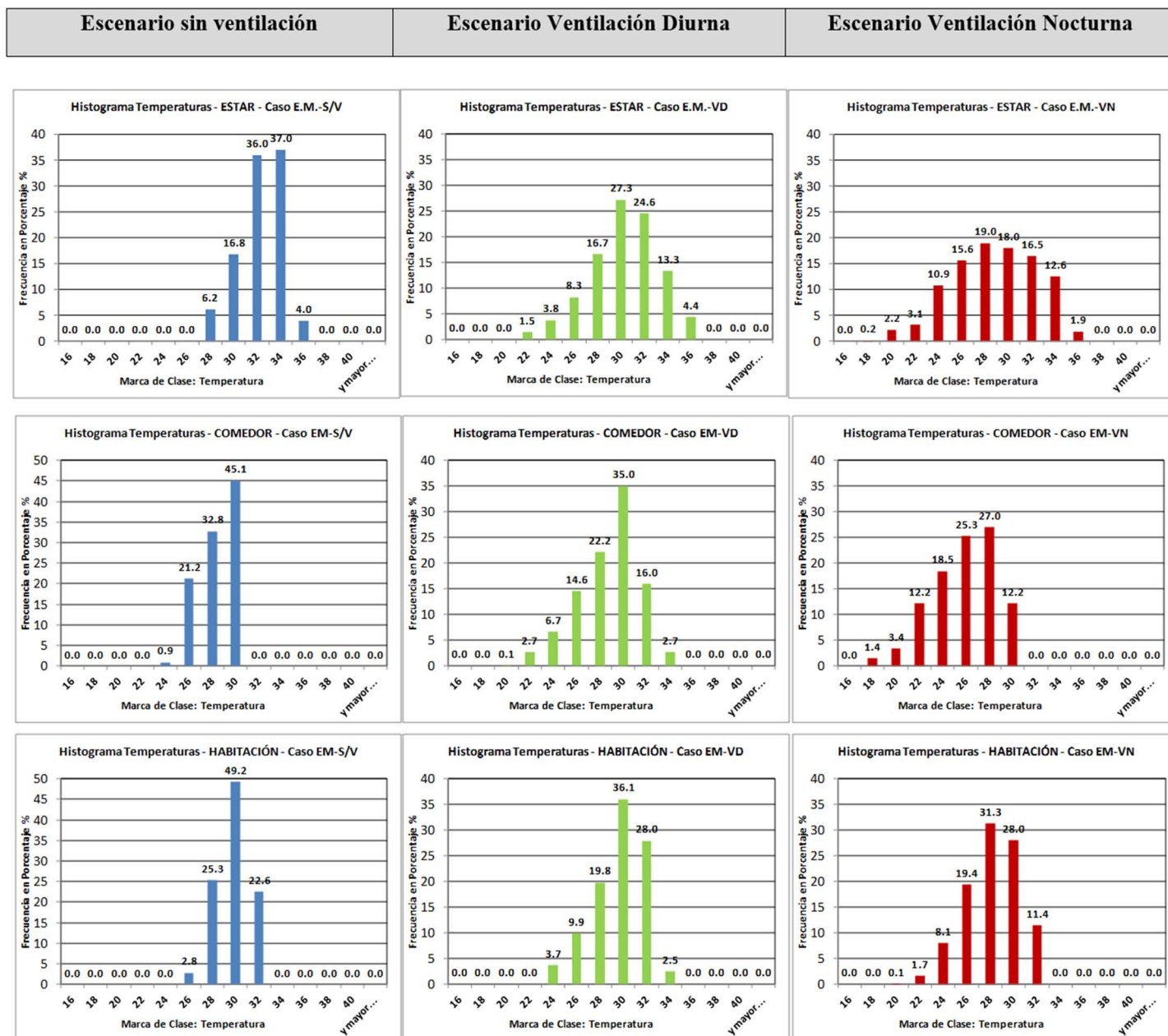


Figura 10. Histogramas de cada uno de los escenarios para cada espacio. Fuente: Elaboración de los autores.

mayor movilidad de las temperaturas internas, que en el caso del modelo tradicional (con mayor masa térmica). En los tres locales, la temperatura baja sostenidamente durante la noche, logrando de este modo que los locales se encuentren por cortos periodos en el rango de confort. Sin embargo, se advierte que la condición de ventilación por la noche provee de temperaturas más bajas que su par diurno en los locales de altura simple -comedor y habitación-. La situación del espacio del estar se considera particular puesto que las aberturas norte, ubicadas en lo alto del espacio, no se han considerado para la ventilación natural debido a que se trata de aberturas con paños de vidrio fijo.

Analizando los resultados entre el modelo másico y el modelo liviano, se puede afirmar que la amplitud térmica se reduce en un rango de 12 a 8°C. Esto señala la importancia de la capacidad de la inercia térmica en climas continentales, como el que ostenta la ciudad de Mendoza.

ENERGÍA.

Para cada tipo de envolvente se presenta el consumo mensual de energía asociado al enfriamiento artificial. El consumo energético de los diferentes modelos no varía sustancialmente, situación que deriva de la condición conservativa de ambos (ambos modelos simulados presentan aislación térmica en muros y techo).

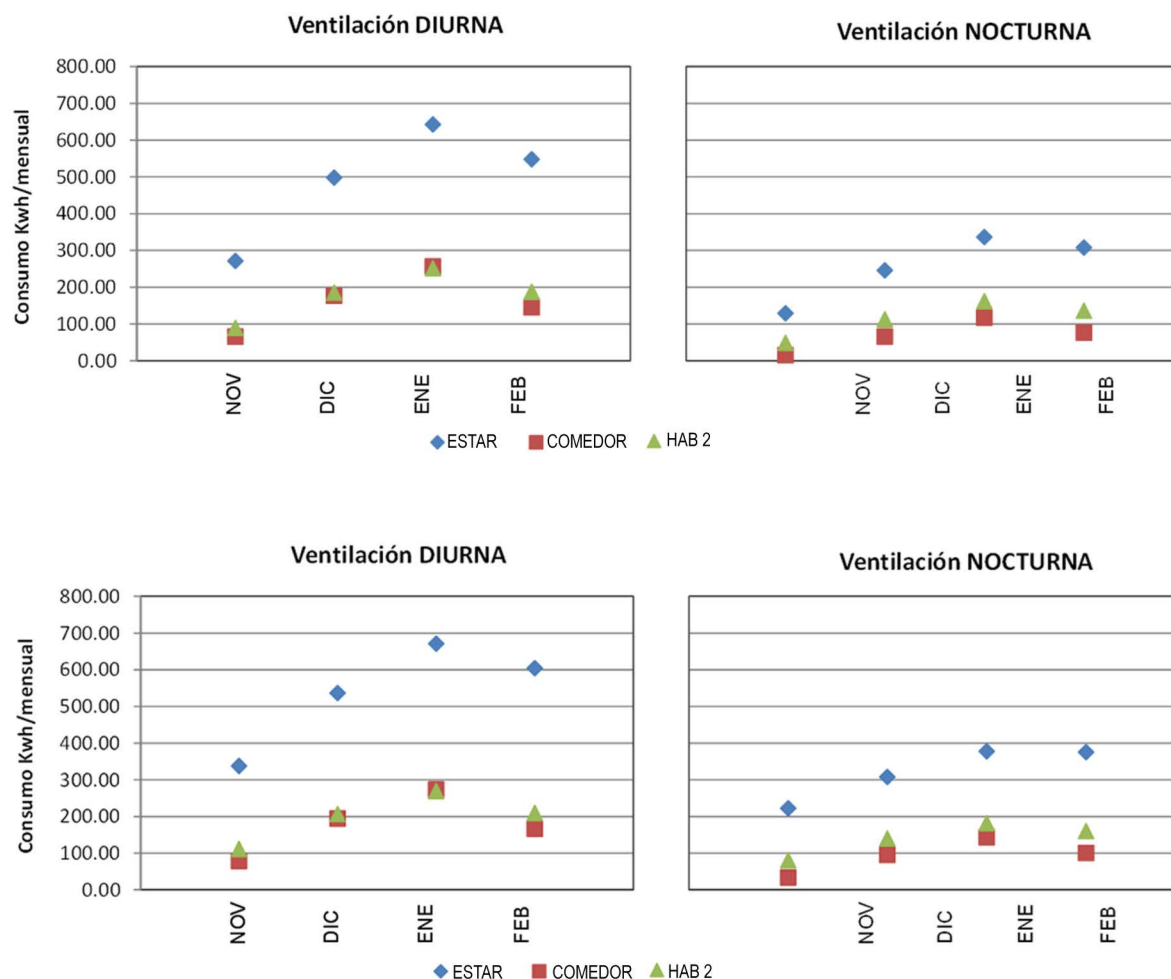


Figura 11. Consumo energético para construcción tradicional. Fuente: Elaboración de los autores

Figura 12: Consumo energético para construcción industrializada. Fuente: Elaboración de los autores.

Por otro lado, se distingue una diferencia cercana al 50% entre los escenarios de ventilación diurna y nocturna. El correcto funcionamiento de la ventilación natural reduce el consumo de energía cuando se propicia la ventilación durante las horas donde la temperatura exterior es más baja que la temperatura interna. Al mismo tiempo, se puede notar que si el usuario no discrimina esta situación y realiza una ventilación diurna, la demanda de energía mensual para enfriamiento se duplica.

CONCLUSIONES.

La ventilación natural en edificios es una estrategia de diseño indispensable para el enfriamiento del mismo. La rutina de la apertura de las ventanas en un edificio altera drásticamente el rendimiento energético de los mismos (Sorgato, Melo y Lamberts, 2016). En este marco, el desarrollo del presente trabajo permitió, a través de la simulación, evaluar la influencia del comportamiento de los usuarios en la ventilación natural de la vivienda y cuantificar

el consumo energético bajo dos situaciones: a. horario de apertura de ventanas (diurna y nocturna) y, b. para dos composiciones tecnológicas de la envolvente (tradicional e industrializada). Un ingreso claro y con solidez de los datos en el grupo "Airflow Network", del programa Energy Plus, disminuye la incertidumbre de los resultados.

Los resultados hacen posible advertir que el usuario de un edificio bioclimático debe abrir por su cuenta las ventanas en la noche durante el período estival, demostrando la efectividad de la masa como elemento de sumidero de calor que se debe descargar por efecto de ventilación, que lame el calor de los paramentos permitiendo el descenso de la temperatura en horas de la madrugada. En cuanto a las diferencias entre el modelo tradicional y el industrializado, se constató que el primero consigue, por sobre el segundo, una disminución de la temperatura de 5°C, para el espacio de mayor volumen de aire y doble altura (estar), y de 4°C, en relación al espacio de menor volumen y altura estándar (comedor), para una amplitud térmica exterior de 15°C. Se obtiene una situación similar a la expuesta por Donald y

Ghisi (2011) quienes también concluyen que la adopción de una envolvente con mayor capacidad térmica reduce la cantidad de horas de desconfort.

En relación a la eficiencia energética, se advirtió que favoreciendo la ventilación nocturna se establece una diferencia en el consumo energético cercano al 50% menor que su par diurno, para los dos tipos de construcción.

Los resultados de consumo energético de ambos modelos, tradicional e industrializado, no presentan diferencias significativas, sin embargo, las condiciones térmicas interiores son distintas. En el modelo másico, alcanzan un mayor acoplamiento, reduciéndose de 12°C a 8°C la amplitud térmica interior. Esta situación provee de confort térmico a los usuarios. En definitiva, el uso de la masa térmica (inercia térmica) en climas templados continentales aumenta la calidad de las condiciones térmicas de los espacios, sobre todo en verano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2009.

BRAGER Gail y BAKER Lindsay. Occupant satisfaction in mixed-mode buildings. *Building Research & Information*, 2009, vol. 37, n° 4, pp. 369-380.

CHEN, Yujiao; TONGA, Zheming y MALKAWIA, Ali. Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. *Building and Environment*, 2017, vol. 122, pp. 386-396.

CORGNATI, Stefano P.; FABRIZIO, Enrico; RAIMONDO, Daniela y FILIPPI, Marco. Categories of indoor environmental quality and building energy demand for heating and cooling. *Building Simulation Journal*, 2011, vol. 4, n° 2, pp. 97-105.

CRAWLEY, Drury B.; LAWRIE, Linda K.; WINKELMANN, Frederick C.; BUHL, W. F.; HUANG, Joe Y.; PEDERSEN, Curtis O.; STRAND, Richard K.; LIESEN, Richard J.; FISHER, Daniel E.; WITTE, Michael J. y GLAZER, Jason. Energy Plus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 2001, vol 33, n° 4, pp. 319-331.

EBEL, Witta; GROßKLOS Marc; KNISSEL, Jens; LOGA, Tobias; KORNELIA, Müller. *Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern. Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der 'Gartenhofsiedlung Lummerlund' in Wiesbaden-Dotzheim*. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt IWU, 2003.

ENERGY PLUS. *Software de simulación de energía* [en línea]. Estados Unidos Departamento de Energía. Disponible en: <https://energyplus.net>.

ESTEVEZ, Alfredo; GELARDI, Daniel; OLIVA, Alejandro. The Shape in the Bioclimatic Architecture: The FAEP Factor. En: *Proceedings of II Conf. Teachers in Architecture*, Florencia, 1997, cap. 3.12.

FABI, Valentina; VINTHER ANDERSEN, Rune; CORGNATI, Stefano y W. OLESEN, Bjarne. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment*, 2012, vol. 58, pp. 188-198.

FILIPPÍN, Celina; FLORES LARSEN, Silvana; BEASCOCHEA, Alicia; LESINO, Graciela. Response of conventional and energy-saving buildings to design and human dependent factors. *Solar Energy*, 2005, vol. 78, n° 3, pp. 455-470.

GIVONI, Baruch. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1998.

GONZÁLEZ CÁCERES, Alex y DÍAZ CISTERNAS, Muriel. Función e impacto del archivo climático sobre las simulaciones de demanda energética. *Hábitat Sustentable*, 2013, vol. 3, n° 2, pp. 75-85.

DONALD PEREIRA, Cláudia y GHISI, Enedir. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. *Energy and Building*, 2011, vol. 43, n° 12, pp. 3391-3399.

HALDI, Frédéric y ROBINSON, Darren. Interactions with window openings by office occupants. *Building and Environment*, 2009, vol. 44, n° 12, pp. 2378-2395.

HENSEN, Jan. Simulation of building energy and indoor environmental quality – some weather data issues. En: *Proceedings of the International Workshop on Climate Data and their Applications in Engineering*, 4-6 octubre. Praga: Hydrometeorological Institute, 1999, pp. 1-15.

HOES, Pieter-Jan; HENSEN, Jan; LOOMANS, M.G.L.C.; DE VRIES, Bert; BOURGEOIS, Denis. User behavior in whole building simulation. *Energy and Building*, 2009, vol. 41, n° 3, pp. 295-302.

IRAM 11603. *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación Bioambiental de la República de Argentina*. Buenos Aires, 1996.

IRAM 11605, *Aislamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en viviendas*. Buenos Aires: 1996.

IWASHITA, Go y AKASAKA, Hiroshi. The effect of human behavior on natural ventilation rate and indoor environment in summer – a field study in southern Japan. *Energy and Building*, 1997, vol. 25, n° 3, pp. 195-205.

GU, Lixing. *Airflow network modeling in EnergyPlus*. IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association, 2007.

MERCADO, M. Victoria; BAREA, Gustavo y ESTEVES Alfredo. Auditoría y simulación energética en la ciudad de Mendoza, Argentina. Análisis del comportamiento térmico de una vivienda unifamiliar de diseño pasivo y consumo energético anual. En: *Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación. ASADES*. Salta, 2015, pp. 05.147-05.158.

MICHAEL, Aimilios; DEMOSTHENOUS, Despina y PHILOKYPROU, Maria. Natural ventilation for cooling in mediterranean climate: A case study in vernacular architecture of Cyprus. *Energy and Building*, 2017, vol. 144, pp. 333-345.

NICOL, J. Fergus. Characterizing occupant behavior in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds heaters and fans. En: *Proceedings of the 7th International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro: Seven International IBPSA, 2001, pp. 1073-1078.

NICOL, J. Fergus y HUMPHREYS, Michael. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Building*, 2002, vol. 34, n° 6, pp. 563-572.

RAYA Ilfitkhar A.; NICOL J. Fergus; MCCARTNEY, Kathryn J. y HUMPHREYS, Michel A. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. *Energy and Buildings*, 2001, vol. 33, n° 3, pp. 235-244.

ROPERO, Daniel y COMAS MORA, Ana. Arquitectura y construcción modular de viviendas [en línea]. [Consultado 20 febrero 2018]. Disponible en: http://eraikal.blog.euskadi.eus/wp-content/uploads/2013/01/Construcci_n-Modular-y-Arquitectura-2.pdf. España.

SHAVIV, Edna; YEZIORO, Abraham y CAPELUTO, Isaac G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy*, 2001, vol. 24, n° 3-4, pp. 445-452.

SORGATO, Marcio J.; MELO, Ana Paula y LAMBERTS, Roberto. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. *Energy and Building*, 2016, vol. 133, pp. 1-16.

LIPING, Wang y HIEN, Wong Nyuk. The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Building and Environment*, 2007, vol. 42, n° 12, pp. 4006-4015.

YUN, Geun Young y STEMEERS, Koen. Time dependent occupant behavior models of window control in summer. *Building and Environment*, 2008, vol. 43, n° 9, pp. 1471-1482.